

Technical Note

مقاله ترویجی

Technical, Environmental and Economic Review of Salt Water Desalination and Analysis for Iran

بررسی فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی نمک‌زدایی آب شور و تحلیل شرایط برای ایران

Mohammadreza Fadaei Tehrani^{1*} and Maryam Abarshi²

1- Assistant Professor, Educational and Research Center, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
2- PhD in Water and Environment, Educational and Research Center, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: mfadaei@nri.ac.ir

Received: 29/04/2023

Revised: 13/06/2023

Accepted: 29/06/2023

© IWWA

Abstract

Saltwater desalination technologies have evolved as an effective and reliable solution for water supply over the last few decades. The development of desalination units in the southern coasts of Iran, is considered as one of the main solutions for sustainable water supply. In this research, by studying the three leading countries in seawater desalination, the improvement path of their facilities have been evaluated, and optimal model for the development of desalination units in Iran has been presented. According to the results, four challenges of salty wastewater, damage at the inlet, high energy consumption and the poverty of minerals is observed in desalinated water. Based on the findings, increasing the country's current capacity in seawater desalination from 585,000 to 1,150,000 m³/day is needed to sustainably supply the drinking needs of water-deficient provinces. Based on the economic analysis, including the price of subsidized electricity in Iran, the total price of each cubic meter of water for near the coast, Kerman, Yazd and Birjand is estimated to be 432, 702, 972 and 1026 thousand Rials, respectively. Also, in terms of salinity and environmental issues, the location of sweetening units on the coasts of Makran has an advantage over the Persian Gulf.

Keywords: Salt Removal, Salty Water, Persian Gulf, Sweetening.

محمد رضا فدائی تهرانی^{۱*} و مریم ابارشی^۲

۱- استادیار مجتمع آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

۲- دکترای آب و محیط‌زیست، مجتمع آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق تهران، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: mfadaei@nri.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

فناوری‌های نمک‌زدایی آب شور به‌عنوان یک راه‌کار موثر و مطمئن برای تامین آب طی چند دهه اخیر تکامل یافته‌اند. توسعه واحدهای نمک‌زدایی در سواحل جنوبی ایران که با معضل کمبود منابع آب شرب مواجه است، به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های اصلی تامین پایدار آب مدنظر است. در پژوهش حاضر، با مطالعه سه کشور پیشرو در نمک‌زدایی آب دریا، مسیر توسعه و مشخصات تاسیسات آن‌ها مورد ارزیابی فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی قرار گرفته و مطابق شرایط بومی کشور، مدل بهینه توسعه واحدهای نمک‌زدایی در ایران، ارائه می‌شود. بنابر تجربیات موجود و نتایج تحقیقات علمی، پساب شور، آسیب در ورودی، مصرف بالای انرژی و فقر مواد معدنی در آب تولیدشده، چهار چالش اصلی در نمک‌زدایی آب دریا است. براساس یافته‌های این مطالعه، افزایش ظرفیت روزانه فعلی کشور در نمک‌زدایی آب دریا از ۵۸۵،۰۰۰ به حداقل ۱،۱۵۰،۰۰۰ مترمکعب برای تامین مصارف شرب استان‌های دارای کمبود آبی، ضروری است. بر مبنای تحلیل اقتصادی انجام شده با احتساب بهای برق یارانه‌ای در ایران، قیمت تمام‌شده هر مترمکعب آب برای مجاور دریا، کرمان، یزد و بیرجند به ترتیب برابر ۴۳۲، ۷۰۲، ۹۷۲ و ۱۰۲۶ هزار ریال برآورد می‌شود. هم‌چنین، به لحاظ شوری و مسائل محیط‌زیستی، مکان‌یابی واحدهای نمک‌زدایی در سواحل مکران بر سواحل خلیج فارس مزیت دارد.

کلمات کلیدی: نمک‌زدایی؛ آب شور؛ خلیج فارس؛ نمک‌زدایی.

تولید آب شیرین از طریق نمک‌زدایی هستند. هرچند برای نمک‌زدایی آب فن‌آوری‌های متنوعی وجود دارد، اما دو روش حرارتی و غشائی به‌طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار گرفته است. فرآیند مبتنی بر حرارت شامل تبخیر آب شور با استفاده از انرژی حرارتی (گرما) و جمع‌آوری میعانات نمک‌زدایی برای تولید آب شیرین است. برای چندین دهه، فناوری مبتنی بر حرارت به‌طور گسترده در کشورهای حاشیه خلیج فارس که در آن سوخت فسیلی فراوانی برای تولید انرژی حرارتی مورد نیاز در دسترس بود، استفاده شد؛ لیکن به‌دلیل تبعات محیط‌زیستی سوزاندن نفت و گاز و نقش آن در گرمایش کره زمین، تمایل به روش‌های غشائی بر مبنای برق تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است (Elimelech and Phillip, 2011).

از جمله رایج‌ترین فناوری‌های حرارتی می‌توان فلاش چند مرحله‌ای (MSF)^۴ و تقطیر چند اثره (MED)^۵ را نام برد. MSF به‌عنوان یک‌سری مراحل کار می‌کند که از بخار گرم و کندانسور برای جداسازی آب از نمک استفاده می‌کند. بخار گرم‌شده آب شور را گرم می‌کند و فشار در مراحل متعدد کاهش می‌یابد؛ بنابراین آب به بخار سرد شده تبدیل می‌شود. از طرف دیگر، پساب نمکی پس از هر مرحله تشکیل می‌شود. به‌طور مشابه، MED از تکنیک مشابهی از چندین مخزن استفاده می‌کند که برای تصفیه آب دریا به بخار گرم و کندانسورها متکی است (Xu et al., 2013; Schorr et al., 2012). تفاوت عمده‌ای که MED را از MSF متمایز می‌کند، روش‌های تبخیر و انتقال حرارت است. در MED، تبخیر زمانی اتفاق می‌افتد که آب تغذیه با سطح انتقال حرارت تماس پیدا کند. درحالی‌که برعکس، فرآیندهای گرمایش MSF فقط در داخل لوله‌ها رخ می‌دهد.

از سوی دیگر، در فناوری مبتنی بر غشاء، آب شور از طریق یک غشای انتخابی به آب شیرین عبور کرده و نمک‌های معلق و سایر جامدات باقی‌مانده در پشت غشاء، تفکیک می‌یابند. فناوری غشایی برای تصفیه آب شامل اسمز معکوس (RO)^۶، میکروفیلتراسیون (MF)^۷، اولترافیلتراسیون (UF)^۸ و نانو فیلتراسیون (NF)^۹ تقسیم می‌شود. مکانیسم جداسازی در MF، UF و NF عمدتاً حذف اندازه است درحالی‌که RO از یک پدیده فیزیکی متفاوت بر پایه پدیده نشر، استفاده می‌کند. اسمز معکوس آب خوراک را با استفاده از غشاهای دو جریان آب غلیظ با شوری بالا (یا پساب نمکی) و آب تصفیه‌شده بدون نمک جدا می‌کند. با این‌حال، تفاوت عمده بین این فناوری‌ها اندازه منافذ است (Curto et al., 2021).

RO رایج‌ترین فن‌آوری نمک‌زدایی است که برای تصفیه آب

آب مهم‌ترین ماده طبیعت و به‌وجود آورنده حیات است. تامین آب کافی و با کیفیت مناسب برای شرب، کشاورزی و صنعت، اصلی‌ترین نیاز جوامع و از مهم‌ترین وظائف حکومت‌ها به‌شمار می‌رود. هرچند بیشتر سطح کره زمین پوشیده از اقیانوس‌ها و دریاها بوده و از منظر فضا، بصورت کره آبی به‌نظر می‌رسد، اما فقط حدود ۱ درصد این آب، در دسترس، شیرین و قابل مصرف است. بنابراین، آب یک منبع محدود و با پراکندگی بسیار متغیر است. پیش‌بینی سازمان همکاری اقتصادی و توسعه OECD نشان می‌دهد در حال حاضر ۴۰ درصد از جمعیت جهان در حوضه‌های رودخانه‌ای با تنش آبی زندگی می‌کنند و تقاضای آب تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۵۵ درصد افزایش خواهد یافت (Keller, 2020). کشورهای خاورمیانه نظیر ایران در کمربند خشک کره زمین جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و هم‌عرض صحراهای بزرگ آفریقا و آسیا بوده و کم و بیش با چالش تامین آب مواجه هستند. متوسط میزان بارندگی سالانه ایران، بنابر آمار ۴۰ ساله برابر ۲۴۵/۱ میلی‌متر، در حدود یک‌سوم بارندگی جهانی است که توزیع آن در نواحی مختلف به‌شدت ناهمگن است (Ajjur and Baalousha, 2021). ایران در قسمت زیادی از سواحل جنوبی خود در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان با کمبود شدید بارش و منابع آب شیرین مواجه بوده و برخلاف سواحل شمالی، اقلیم آن کم‌بارش و با دمای بالا، است. از طرفی گستردگی این سواحل در حاشیه دریا این امکان را به‌وجود آورده تا از منابع آب دریا برای مصارف شرب و صنعت بهره‌برداری نمود.

نمک‌زدایی فرآیند حذف مقدار بیش از حد نمک‌ها و سایر مواد شیمیایی از آب دریا است تا برای مصارف خانگی و سایر مصارف مناسب شود. نمک‌زدایی آب لب‌شور (غلظت نمک از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب دریا (دارای دامنه شوری بین ۳۰۰۰ تا ۴۴۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در چند دهه اخیر، مورد توجه قرار گرفته است. مطابق با دستورالعمل‌های کیفیت آب آشامیدنی (GDWQ)^۱ از سازمان بهداشت جهانی (WHO)^۲ مراد از نمک‌زدایی یا نمک‌زدایی آب دریا، کاهش غلظت نمک به زیر ۵۰۰ ppm^۳ است.

مردم، دانشمندان و دولت‌ها همگی به‌دنبال روش‌های نمک‌زدایی مقرون به‌صرفه و ایمن برای محیط‌زیست هستند تا زمین را از کمبود آب نجات دهند. کشورهای خلیج فارس به‌دلیل منابع محدود آب شیرین و جمعیت کمتر در مقایسه با سایر کشورهای توسعه یافته و وجود منابع سرشار انرژی، پیشرو در

است. در تحقیق حاضر تلاش شده به این سوال که "نمک‌زدایی آب دریا تا چه حدی می‌تواند پاسخگوی نیاز آبی کشور ایران باشد؟" پاسخ داده شود.

۲- مواد و روش‌ها

تا سال ۲۰۱۸، حدود ۱۷ هزار واحد آب‌شیرین‌کن در نقاط مختلف کره زمین تقریباً ۳۵/۸ میلیارد متر مکعب در سال (۹۵/۴ میلیون مترمکعب در روز) برای بیش از ۳۰۰ میلیون نفر در ۱۷۷ کشور تولید کردند. پیش‌بینی می‌شود ظرفیت تولید تا سال ۲۰۵۰ با رشد دوبرابری به ۷۰/۱ میلیارد مترمکعب در سال برسد. اکثر کشورهایی که از آب شیرین‌کن استفاده می‌کنند، کشورهای پردرآمدی هستند که منابع آب شیرین محدودی دارند. جدول ۱ تولیدکنندگان برتر آب شیرین‌شده و سهم جهانی آن‌ها را نشان می‌دهد. کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) تقریباً نیمی از سهم جهانی ظرفیت نمک‌زدایی (۴۸ درصد) را تشکیل می‌دهند. عربستان سعودی هم‌چنان با سهم ۲۲ درصد بزرگ‌ترین تولیدکننده آب شیرین و پس از آن ایالات متحده آمریکا با سهم ۱۴ درصد قرار دارد. کشورهایی مانند امارات متحده عربی، قطر و کویت تقریباً ۱۰۰ درصد از منابع آبی خود را به آب شیرین‌شده متکی هستند. از سوی دیگر، کشورهای با درآمد پایین (مانند آسیای جنوبی و جنوب صحرای آفریقا) سهم ناچیزی در تولید جهانی با کمتر از ۰/۱ درصد دارند (Ihsanullah et al., 2021).

دریا و آب‌های لب‌شور در سراسر جهان به دلیل کارایی بالا، پساب کمتر، هزینه انرژی پایین در مقایسه با سایر فناوری‌ها مزیت دارد. فناوری RO امکان تمیز نگه‌داشتن محیط‌زیست، کاهش ضایعات و در نتیجه رعایت استانداردهای بهداشت عمومی را بهتر از سایر روش‌ها فراهم می‌کند. در مقایسه با فرآیندهای حرارتی، RO نرخ بازیابی بالاتری دارد، بنابراین آب نمک کمتری تولید می‌کند (Asif et al., 2019). دفع پساب نمکی، آب شور با غلظت بالای نمک، بزرگ‌ترین چالش محیط‌زیستی ناشی از واحدهای نمک‌زدایی بوده که لازم است قبل از تخلیه رقیق شود تا به اکوسیستم دریا آسیب نرساند. در سال ۲۰۲۰، آب شیرین تولید شده از روش RO با نسبت ۶۹ درصد تولید کل، دارای بالاترین سهم نمک‌زدایی بوده و پس از آن دو فناوری اصلی حرارتی MSF و MED به ترتیب با سهم ۱۸ و ۷ درصد قرار داشته است. این سه فناوری ۹۴ درصد از آب شیرین‌شده تولید شده در جهان را تشکیل می‌دهند (Huang et al., 2020).

در پژوهش حاضر، در کنار بررسی تجربیات سه کشور پیشرو در نمک‌زدایی آب دریا (عربستان، ایالات متحده آمریکا و امارات متحده عربی) و مقایسه وضعیت ایران با آن‌ها، آسیب‌شناسی فناوری‌های مربوط به نمک‌زدایی به لحاظ فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی انجام شده است. بر مبنای نتایج به دست آمده، ضمن تحلیل اقتصادی با محاسبه هزینه تمام‌شده هر مترمکعب آب تصفیه شده، ظرفیت مورد نیاز نمک‌زدایی آب برای ایران تخمین و محل بهینه برای احداث واحدهای آب‌شیرین‌کن پیشنهاد شده

جدول ۱- ده کشور برتر در زمینه نمک‌زدایی آب دریا (Asif et al., 2019)

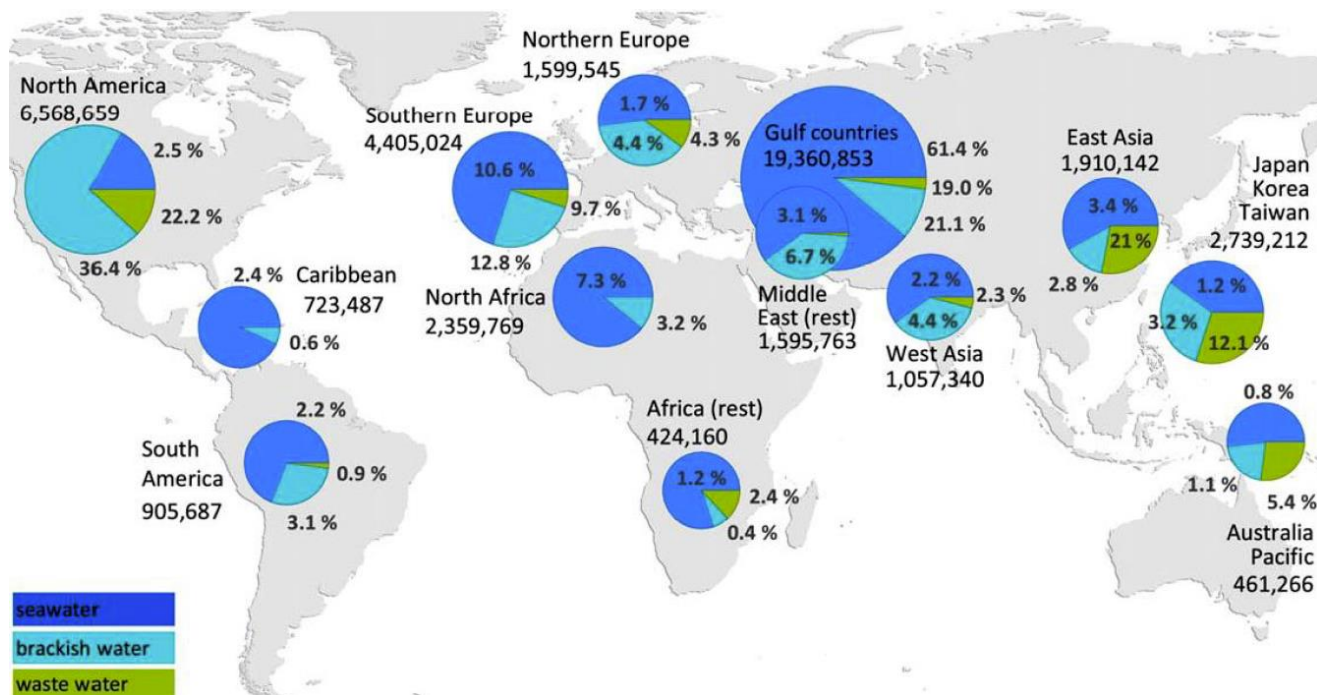
رتبه	نام کشور	ظرفیت تولید (میلیون مترمکعب در روز)	مترمکعب تولید سالانه به ازای هر نفر جمعیت	سهم از کل (درصد)
۱	عربستان سعودی	۱۲	۳۵۳	۲۲/۰
۲	ایالات متحده آمریکا	۱۰/۶	۳۲/۳	۱۴/۰
۳	امارات متحده عربی	۷/۵	۷۷۳	۱۲/۵
۴	اسپانیا	۵/۳	۱۱۲	۸/۹
۵	کویت	۲/۵	۶۲۵	۴/۲
۶	چین	۲/۴	۱/۷	۴/۰
۷	ژاپن	۱/۶	۱۲/۷	۲/۶
۸	قطر	۱/۴	۵۰۰	۲/۴
۹	الجزایر	۱/۴	۳۲/۵	۲/۳
۱۰	استرالیا	۱/۲	۴۸	۲/۰

سطح غشا که منجر به کاهش شار نفوذ و دفع نمک و در نهایت انسداد غشا می‌شود، رسوب غشایی می‌تواند به طور قابل توجهی بر کیفیت فیلتراسیون و تولید نیز تأثیر بگذارد. میانگین طول عمر یک غشا بین ۲ تا ۵ سال تخمین زده می‌شود. نوع و دمای آب

اگرچه RO دارای طیف گسترده‌ای از مزیت‌ها نظیر مصرف انرژی کمتر، سازگاری بیشتر با محیط‌زیست و تولید شیرابه نمکی کمتری است، رسوبات جمع‌شده روی غشا هم‌چنان یک چالش بزرگ است. رسوب عبارت است از تجمع ذرات نامطلوب روی

بروز رسوب، کارائی RO در تولید آب شیرین کاهش می‌یابد. در نتیجه، انرژی، نگهداری و هزینه بیشتری برای غلبه بر مشکل ناشی از رسوب غشا مورد نیاز است. در شکل ۱ فناوری و میزان سهم کشورهای مختلف در نمک‌زدایی آب شور نشان داده شده است. در ادامه این قسمت، وضعیت سه کشور برتر ارائه و شرایط ایران در مقایسه با آن بیان شده است.

خوراک، میزان پیش‌تصفیه، تمیز کردن و نگهداری از عوامل موثر بر طول عمر غشا هستند. به‌عنوان مثال، مطالعه تصفیه‌خانه SWRO در یونان نشان داد که اگر پیش‌تصفیه آب خوراک به‌درستی برای حذف آلاینده‌ها از آب انجام شود، غشای RO می‌تواند تا ۵ سال دوام بیاورد (Moradi et al., 2019). چنان‌چه پیش‌تصفیه نادیده گرفته‌شود، تمیز کردن بیشتری مورد نیاز خواهد بود که می‌تواند طول عمر غشا را کاهش دهد. در صورت



شکل ۱- سهم مشارکت کشورهای مناطق مختلف در نمک‌زدایی آب شور (Lattemann et al., 2010)

تبدیل آب شور (SWCC)^{۱۱} با فرمان سلطنتی تأسیس شد تا تمام آب مورد نیاز مناطق مختلف عربستان را با آب نمک‌زدایی تامین کند. همچنین، مسئولیت سایر امور مربوط به یکپارچه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب طبیعی، از جمله آب‌های زیرزمینی و ساخت واحدهای آب شیرین‌کن با بهترین فناوری موجود نیز به SWCC واگذار شد. بنابراین دستاوردها، عربستان سعودی یکی از موفق‌ترین کشورهای در نمک‌زدایی و استحصال آب شیرین از دریا به‌شمار می‌رود. در سال ۲۰۱۹، دو گواهینامه توسط کتاب رکوردهای جهانی گینس، یکی برای SWCC، بزرگترین شرکت نمک‌زدایی در جهان با تولید روزانه ۵/۶ میلیون مترمکعب آب شیرین و دومی برای کارخانه آب شیرین‌کن الجبیل، بزرگترین تاسیسات در جهان با ۱/۴ میلیون مترمکعب در روز، به عربستان سعودی اعطا شد. در طی این دهه‌ها، SWCC تولید آب خود را بیش از ۹۰ برابر افزایش داده و به تولید سالانه ۱۸۸۴ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۹ رسانده است (Ihsanullah et al., 2021). نکته حائز اهمیت این‌که، تولید سالانه به‌طور قابل‌توجهی

۲-۱- عربستان سعودی

عربستان سعودی در منتهی‌الیه غرب آسیا واقع شده و بخش بزرگی از شبه جزیره عربستان را تشکیل می‌دهد. این کشور دارای ۳۴ میلیون جمعیت در مساحت ۲,۱۴۹,۶۹۰.۰ کیلومتر مربع است. تا سال ۲۰۱۹، حدود ۳۳ کارخانه آب شیرین‌کن بزرگتر از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز، روزانه بیش از ۱۲ میلیون مترمکعب تولید کردند. برای بیش از ۱۰۰ سال، عربستان سعودی نمک‌زدایی آب را از طریق تقطیر انجام داده است. در ابتدا، از زال سنگ و حتی بدنه کشتی‌های شکسته برای تقطیر آب استفاده می‌شد. در سال ۱۹۲۸، عربستان سعودی دو کارخانه تقطیر جداگانه در ساحل غربی، نزدیک دریای سرخ احداث نمود. هر کارخانه باید روزانه ۲۳۰ هزار مترمکعب آب شیرین تولید می‌کرد که به‌دلیل حضور زائران و بازدیدکنندگان به شهر مقدس مکه، دسترسی به آب آشامیدنی، ضروری است. در سال ۱۹۷۰، یک کارخانه آب شیرین‌کن دیگر در جده ساخته شد تا روزانه ۵۰۰ هزار مترمکعب آب شیرین تولید کند. در سپتامبر ۱۹۷۴، شرکت

دریا است. مانند سایر نقاط جهان، پرکاربردترین فناوری نمک‌زدایی در ایالات‌متحده RO با سهم حدود ۷۰ درصد است.

به‌طور خاص مناطق ساحلی ایالات‌متحده، طی دو قرن گذشته به آب‌های سطحی و زیرزمینی متکی بوده‌اند. در دو دهه اخیر به‌دلیل خشکسالی‌های پی‌درپی و نفوذ آب شور، این منابع ارزشمند به منابع آبی غیرقابل اعتماد تبدیل شده‌اند. برای غلبه بر کمبود آب شیرین، مقامات ایالتی از بسیاری از پروژه‌های نمک‌زدایی برای کاهش وابستگی به آب‌های سطحی و زیرزمینی، حمایت کرده‌اند. ایالت‌های کالیفرنیا، فلوریدا و تگزاس، به‌عنوان مناطق ساحلی نیازمند به منابع آب شیرین پایدار، ایالت‌های پیشرو برای توسعه واحدهای نمک‌زدایی هستند. اخیراً، کالیفرنیا به‌دلیل تشدید کمبود آب و پیشرفت در فناوری نمک‌زدایی، معطوف شدن دیدگاه‌ها به نمک‌زدایی آب شور را تجربه کرده است. پیش از این، کالیفرنیا علاقه محدودی به نمک‌زدایی داشت تا این‌که کارخانه نمک‌زدایی کارلزباد^{۱۵} در دسامبر ۲۰۱۵ افتتاح شد که در زمان تاسیس، بزرگترین واحد نمک‌زدایی آب در ایالات‌متحده بود. این پروژه برای تامین آب شرب ساکنان سن‌دیگو، یک میلیارد دلار هزینه داشت (Ziolkowska, 2017).

کارخانه آب‌شیرین‌کن کارلزباد بیش از ۱۹۰ هزار مترمکعب در روز تولید می‌کند تا حدود ۳۰ درصد از کل آب مورد نیاز سن‌دیگو را پوشش دهد. پس از آن، در کالیفرنیا به دلایلی نظیر افزایش تقاضای آب، بهبود فناوری، و افزایش یارانه‌های دولتی، تمایل به نمک‌زائی افزایش پیدا کرد. دپارتمان منابع آب کالیفرنیا (DWR)^{۱۶} بیش از ۱۰۰ میلیون دلار کمک بلاعوض را برای مطالعات امکان‌پذیری و تبعات محیط‌زیستی اختصاص داده و پیشنهاد ساخت ۲۰ تاسیسات نمک‌زدایی آب دیگر را در سراسر ایالت ارائه نمود (Panagopoulos et al., 2019).

علی‌رغم مخالفت‌هایی که بر نگرانی‌های محیط‌زیستی دریایی متمرکز شده، رهبران کالیفرنیا مشتاقانه منتظر ساخت کارخانه‌های بیشتری در آینده نزدیک هستند. آن‌ها حامی بهبود مستمر فناوری پیشرفته‌ای هستند که هزینه کل را کاهش و در عین حال کارایی را افزایش می‌دهد؛ البته، هزینه سایر منابع آبی نیز در حال افزایش است.

۲-۳- امارات متحده عربی

امارات متحده عربی، به اختصار امارات، کشوری در غرب آسیا و شمال شرق شبه‌جزیره عربستان واقع شده که در سال ۲۰۲۰ جمعیت آن ۹/۹ میلیون نفر ثبت شده است. اقلیم امارات خشک و بیابانی و متوسط بارندگی سالانه در سواحل آن کمتر از ۱۲۰

از ۱۰۷۱ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۶ به ۱۸۸۴ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۹ (افزایش ۶۴ درصد طی سه سال) ارتقا یافته است.

تا سال ۲۰۱۹، عربستان سعودی مالک و اداره کننده ۳۳ کارخانه آب‌شیرین‌کن در دو ساحل بود؛ ۸ کارخانه در شرق که ۵۵ درصد از کل تولید سالانه را تولید می‌کنند و ۲۵ کارخانه در غرب ۴۴ درصد باقی‌مانده را تولید می‌کنند. تصفیه‌خانه‌هایی که در ساحل غربی، نزدیک مکه و جده قرار دارند، قدیمی‌ترین واحدهای نمک‌زدایی هستند. اخیراً SWCC سه واحد اصلی، دو تای آن‌ها در غرب و یکی در ساحل شرقی، به‌دلیل تأثیرات محیط‌زیستی و در دسترس بودن فناوری بهتری که باعث صرفه‌جویی در هزینه و انرژی می‌شود، را تعطیل نمود. مانند سایر نقاط جهان، در عربستان سعودی نیز از RO به‌عنوان فن‌آوری اصلی نمک‌زدایی در ۵۳ درصد از تاسیسات خود استفاده می‌شود. هرچند، فناوری‌های حرارتی مانند MSF و MED هنوز با سهم ۴۳ درصدی رایج هستند لیکن با گذشت زمان به تدریج روند نزولی دارند (Ihsanullah et al., 2021).

۲-۲- ایالات‌متحده آمریکا

ایالات‌متحده آمریکا با ۳۲۸ میلیون نفر جمعیت در مرکز آمریکای شمالی، چهارمین کشور بزرگ جهان است. تا سال ۲۰۱۸، تقریباً ۲۲۴۰ کارخانه آب‌شیرین‌کن بزرگتر از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز ۱۱ میلیون مترمکعب در روز در ایالات‌متحده تولید کردند (Miller et al., 2021). از سال ۱۹۵۲، ایالات‌متحده از نمک‌زدایی آب با تصویب قانون تبدیل آب شور (SWCA)^{۱۲} توسط کنگره استفاده کرد. نزدیک به ۱۰ سال بعد، جان‌اف‌کندی حمایت خود را برای گسترش استفاده از نمک‌زدایی تجاری ابراز کرد. او آشکارا گفت: «نمک‌زدایی می‌تواند بیشتر از هر پیشرفت علمی دیگری برای نجات مردان و زنان از زندگی فقیرانه موثر باشد». در دهه ۱۹۷۰ دفتر تحقیقات و فناوری آب (SWCA)^{۱۳} برای تامین مالی فناوری‌های پیشرفته در نمک‌زدایی تاسیس شد. بین سال‌های ۱۹۷۰ و ۲۰۱۰، ایالات‌متحده برای حمایت از تحقیق و توسعه فن‌آوری‌های نمک‌زدایی، با فراز و نشیب‌های بودجه‌ای و تنگناهای مالی مواجه شد. تا سال ۲۰۱۰، دولت ایالات‌متحده تقریباً ۲ میلیارد دلار هزینه کرده بود (Cooley et al., 2006). برخلاف سایر نقاط جهان، حدود ۵۰ درصد از آب تصفیه‌شده در ایالات‌متحده، در مقایسه با سایر نقاط جهان که بیشتر آب دریا را تصفیه می‌کنند، از آب لب‌شور^{۱۴} است که نمک‌زدایی آن به‌طور قابل توجهی راحت‌تر و کم‌هزینه‌تر از آب شور

بهره‌برداری می‌نمایند که خارج از بحث و موضوع این پژوهش قرار دارد. سهم مجموع این ظرفیت‌ها، در مقایسه با حجم نمک‌زدایی در خلیج فارس و سرجمع جهانی به ترتیب ۳ و ۰/۷ درصد است که ناچیز است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل فنی و محیط‌زیستی

محدودیت در دسترس بودن آب شیرین عامل اصلی نمک‌زدایی آب شور است؛ به طوری که هرچه کمبود آب بیشتر باشد، کشورهای بیشتری نیازمند توسعه واحدهای نمک‌زدایی آب دریا خواهند بود. بر مبنای گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)^{۱۷} کشورهای واقع در خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) شامل عربستان سعودی، کویت، لیبی و امارات متحده عربی، بیش از ۱۰۰۰ درصد تنش آبی را تجربه می‌کنند، در حالی که میانگین جهانی تنها ۱۳ درصد است (FAO, 2018). بر اساس همین گزارش، ایالت‌های مختلف آمریکا، بین ۱۰ تا ۲۵ درصد و مناطق مختلف ایران نیز ۱۰ تا ۶۰ درصد تنش آبی را تجربه می‌کند. تنش آبی به‌عنوان نسبت برداشت آب بر تمام منابع آبی موجود محاسبه می‌شود. در همین حال، انتظار می‌رود که تنش آبی در سطح جهان به سه دلیل اصلی رشد جمعیت، دسترسی محدود به آب شیرین و گرم شدن زمین افزایش یابد. بنابراین، تقاضای زیاد برای نمک‌زدایی به‌ویژه در مناطقی که تحت تنش آبی زندگی می‌کنند، در حال افزایش است. به‌طور مثال، دو کشور عربستان سعودی و ایالات‌متحده آمریکا در مجموع با ۳۶ درصد نمک‌زدایی، بالاترین سهم را دارند. هرچند، رویکردها و انگیزه‌های متفاوتی دارند.

از نظر تقاضای آب، عربستان سعودی برای پوشش تقریباً ۷۰ درصد نیاز مصرف خانگی، به شدت به آب شیرین شده وابسته است. ۳۰ درصد دیگر از آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود. آب شیرین‌شده مصرفی ایالات‌متحده ۴ درصد کل آب مصرفی است که عمدتاً در ایالت‌های کالیفرنیا، فلوریدا و بخشی از تگزاس استفاده می‌شود. از نظر نوع آب خوراک، آب دریا و آب لب‌شور به ترتیب با سهم میانگین جهانی ۶۱ و ۲۱ درصد، منبع اصلی نمک‌زدایی است. عربستان سعودی به‌شدت به آب دریا متکی است در حالی که ایالات‌متحده از آب لب‌شور به‌عنوان منبع اصلی برای نمک‌زدایی استفاده می‌کند. آب لب‌شور نسبت به دریا مزیت بالایی دارد، زیرا شوری کمتری دارد و در نتیجه نیاز به تصفیه و هزینه تمام شده آن، کمتر خواهد بود. انتخاب آب خوراک عمدتاً ناشی از در دسترس بودن منابع است، اما پایداری متعاقب آن

میلی‌متر گزارش شده است. این کشور فاقد جریان روان آب دائمی یا دریاچه آب شیرین است که همواره تامین آب شرب کافی یکی از چالش‌های آن بوده است. در سال ۱۹۷۶ اولین واحد نمک‌زدایی امارات در ابوظبی با ظرفیت روزانه ۲۵۰ مترمکعب راه‌اندازی شد و پس از آن در سایر شهرهای ساحلی این کشور احداث واحدهای نمک‌زدایی توسعه یافت به طوری که تقریباً صددرصد از آب آشامیدنی و تجاری شهرهای ابوظبی و دبئی از طریق نمک‌زدایی آب دریا تامین می‌شود. در گذشته به‌دلیل فراوانی و ارزانی انرژی در امارات، به‌طور عمده از روش MSF برای نمک‌زدایی استفاده می‌شد. لیکن امروزه تمایل به روش‌های پیشرفته مبتنی بر فناوری RO مورد توجه این کشور قرار گرفته است. با توجه به تعهد کشور امارات در کاهش آلاینده‌های محیط‌زیستی، سرمایه‌گذاری برای تامین انرژی نمک‌زدایی آب از منابع جایگزین سوخت فسیلی نظیر انرژی خورشیدی یا نیروگاه‌های برق هسته‌ای در دست انجام است.

۲-۴- ایران

ایران، برخلاف کشورهای عربستان و امارات متحده عربی، کشوری پهناور با منابع آب متعدد است. لیکن توزیع منابع آب در آن یکنواخت نبوده و به‌ویژه مناطق مرکز، شرق و جنوب در امتداد سواحل دریای عمان و خلیج فارس با مشکل کمبود آب شیرین مواجه هستند. یکی از گزینه‌های مناسب برای این مناطق استفاده از آب شور دریا برای تامین بخشی از نیاز شرب به‌عنوان یک منبع پایدار و قابل اعتماد است. در سال ۱۹۶۰ اولین واحد نمک‌زدایی آب دریا در جزیره خارک با ظرفیت ۱۰۰۰ مترمکعب در روز به‌روش MSF احداث شد و پس از آن در شهرهای بوشهر، عسلویه، بندرعباس، کنارک واحدهای نمک‌زدایی آب دریا توسعه یافت. در ایران نیز مشابه سایر کشورهای حوزه خلیج فارس، در گذشته واحدهای نمک‌زدایی حرارتی مورد توجه بوده که در سال‌های اخیر تمایل به RO به‌عنوان جایگزینی مناسب، افزایش یافته است. بنابر آمار غیررسمی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، در انتهای سال ۱۴۰۱، تعداد ۷۸ واحد نمک‌زدایی در استان‌های مختلف با مجموع ظرفیت ۵۸۵ هزار مترمکعب در روز فعال بوده و ۱۶ پروژه دیگر برای توسعه واحدهای نمک‌زدایی با ظرفیت مجموع ۱۵۶ هزار مترمکعب در روز در دست ساخت قرار دارد. این ظرفیت نمک‌زدایی مربوط به شرکت‌های آب و فاضلاب برای تامین مصارف شرب هستند. بنابر آمار انجمن نمک‌زدایی ایران، علاوه بر مصارف شرب، صنایع مختلف به‌صورت متوسط ۲۵۵ هزار مترمکعب در روز از تاسیسات نمک‌زدایی وابسته به صنایع

(محصول) و آب نمک غلیظ فوق شور (پساب نمکی) تولید می‌شود. این پساب، حاوی مقدار قابل توجهی نمک (عمدتاً NaCl) و غلظت‌های متفاوت سرب، ید و نیترات است. کمیت و کیفیت پساب خروجی به نوع آب خوراک، تکنولوژی مورد استفاده و حداکثر ظرفیت کارخانه بستگی دارد. نرخ بازیافت آب برای تعیین درصد تولید آب نمک با تقسیم مقدار آب شیرین‌تولیدشده بر مقدار آب خوراک محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش کیفیت آب خوراک، میزان بازیابی افزایش می‌یابد و مقادیر کمتری آب نمک تولید می‌شود. برای توضیح بیشتر، اگر یک تاسیسات نمک‌زدایی با نرخ بازیافت ۰/۶ کار کند، به این معنی است که ۶۰ درصد از آب خوراک به آب شیرین تبدیل می‌شود و به‌طور پیش‌فرض، ۴۰ درصد باقی‌مانده به آب نمک تبدیل می‌شود. با در نظر گرفتن RO به‌عنوان مثال، نرخ بازیافت کمتر از ۴۲ درصد با آب دریا در مقایسه با ۶۵ درصد برای نمک‌زدایی آب شور ثبت شده است (Jones, 2019).

مطابق شکل ۲، در سال ۲۰۱۸، در مجموع ۱۴۱/۵ میلیون مترمکعب در روز پساب شور از واحدهای نمک‌زدایی دفع شد که بیش از ۷۰ درصد از آن سهم خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA)، ۱۰/۵ درصد سهم آسیای شرقی و اقیانوس آرام و ۳/۹ درصد سهم آمریکای شمالی بود. آب نمک تولیدی MENA می‌تواند تا ۵۰ درصد آب فرآوری‌شده آن باشد، که به این معنی است که میزان بازیابی و کارایی آن‌ها پایین است. آب نمک یا از طریق تخلیه به آب سطحی، تزریق به آب‌های عمیق یا سایر روش‌ها به سیستم آب جهانی دفع می‌شود و یا با هدف تخلیه مایع صفر (ZLD)^{۱۸} مورد تصفیه قرار می‌گیرد. سیستم‌های ZLD برای دستیابی به نرخ بازیابی حداکثری با نرخ بین ۹۵ تا ۹۹ درصد (تولید حداقل پساب نمکی) طراحی شده‌اند. علی‌رغم دانستن این که تصفیه آب نمک گزینه بهتری است، بسیاری از مناطق هنوز آب نمک دفع‌شده را در آب دریا دفع می‌کنند. در سطح جهانی، هیچ استراتژی تخلیه پساب مشخصی متناسب با نوع، اندازه و فناوری موجود برای نمک‌زدایی، وجود ندارد. در عربستان سعودی و اکثر کشورهای MENA، نیروگاه‌های نمک‌زدایی در مجاورت آب‌های ساحلی (دریای سرخ یا خلیج فارس) بوده و بیشتر آن‌ها با یک نیروگاه تولید الکتریسیته همراه هستند و آب نمک با آب خنک‌کننده نیروگاه مخلوط و سپس از طریق لوله‌هایی به دریا تخلیه می‌شود (Khaled et al., 2020). در ایالات‌متحده آمریکا نیز کارخانه‌های نمک‌زدایی بیشتری در سواحل کالیفرنیا ساخته شده و پساب خروجی آن پس از مخلوط شدن با فاضلاب، آب نمک را دوباره به آب دریا دفع می‌کنند.

می‌تواند چالش بزرگی را ایجاد کند. آب لب‌شور تنها ۱ درصد از آب جهان را تشکیل می‌دهد در حالی که دریاها و اقیانوس‌ها، آب شور، ۹۷ درصد از آب کره زمین را تشکیل می‌دهند. کاهش بالقوه، یا تغییر در محتوای نمک منابع آب لب‌شور و تأثیرات ناشی از آن بر اکوسیستم‌های خاصی که آب لب‌شور از آن‌ها استخراج می‌شود، ممکن است یک تهدید محیط‌زیستی باشد (Khaled et al., 2020).

از نظر فناوری، RO تا حد زیادی پرکاربردترین فرآیند نمک‌زدایی آب در سراسر جهان است. ترتیب فناوری نمک‌زدایی در عربستان اول RO با سهم ۵۳ درصد و پس از آن MSF با سهم ۱۲ درصد است؛ هرچند تمایل و گرایش عربستان در سال‌های اخیر به سمت RO متمایل شده است. هم‌مکانی بین نیروگاه و تاسیسات نمک‌زدایی به استفاده از منابع موجود کمک می‌کند. آب خنک‌کننده نیروگاه به‌عنوان منبعی برای مخلوط کردن پساب نمک‌زدایی برای رقیق‌سازی و کاهش شوری قبل از تخلیه استفاده می‌شود. علاوه بر این، عربستان سعودی به دلیل مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی خود به RO متمایل شده است. به همین ترتیب، ایالات‌متحده از RO برای ۶۹ درصد از ظرفیت نمک‌زدایی خود استفاده می‌کند، که با فناوری دوم NF با سهم ۱۵ درصد، فاصله دارد. برخلاف سایر نقاط جهان، ایالات‌متحده از NF به‌عنوان دومین فناوری کاربردی نمک‌زدایی استفاده می‌کند، زیرا هزینه عملیاتی و نگهداری کمتری نسبت به RO دارد (Alobireed, 2014).

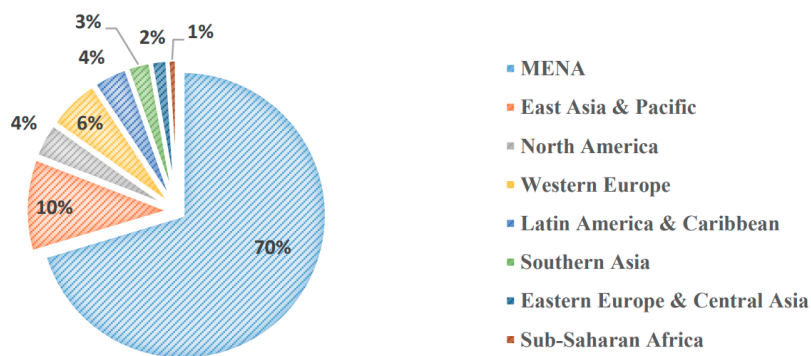
۳-۲- چالش‌های محیط‌زیستی

نمک‌زدایی آب، در حالی که به کشورها کمک می‌کند تا به‌طور قابل اعتماد آب شیرین را تأمین کنند، به دلیل اثرات بالقوه محیط‌زیستی و اقتصادی آن هم‌چنان بحث برانگیز است. مانند هر فرآیند صنعتی دیگری، اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی نمک‌زدایی باید شناسایی، مدیریت و کاهش یابد. پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از مصرف آب دریا و دفع آب‌های غلیظ و گرم‌تر، ماهی‌ها، جوامع اعماق دریا و دیگر ارگانیسم‌های ساحلی را تهدید می‌کند. در حالی که اثرات اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه عملیاتی و نگهداری، هزینه انرژی و هزینه مدیریت پساب نمکی است. همچنین، آلاینده‌گی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و تولید انرژی برای واحدهای نمک‌زدایی به‌طور غیرمستقیم تأثیرگذار خواهد بود.

۳-۲-۱- پساب غلیظ نمک

به طور کلی، با عبور آب شور از واحد نمک‌زدایی، آب شیرین

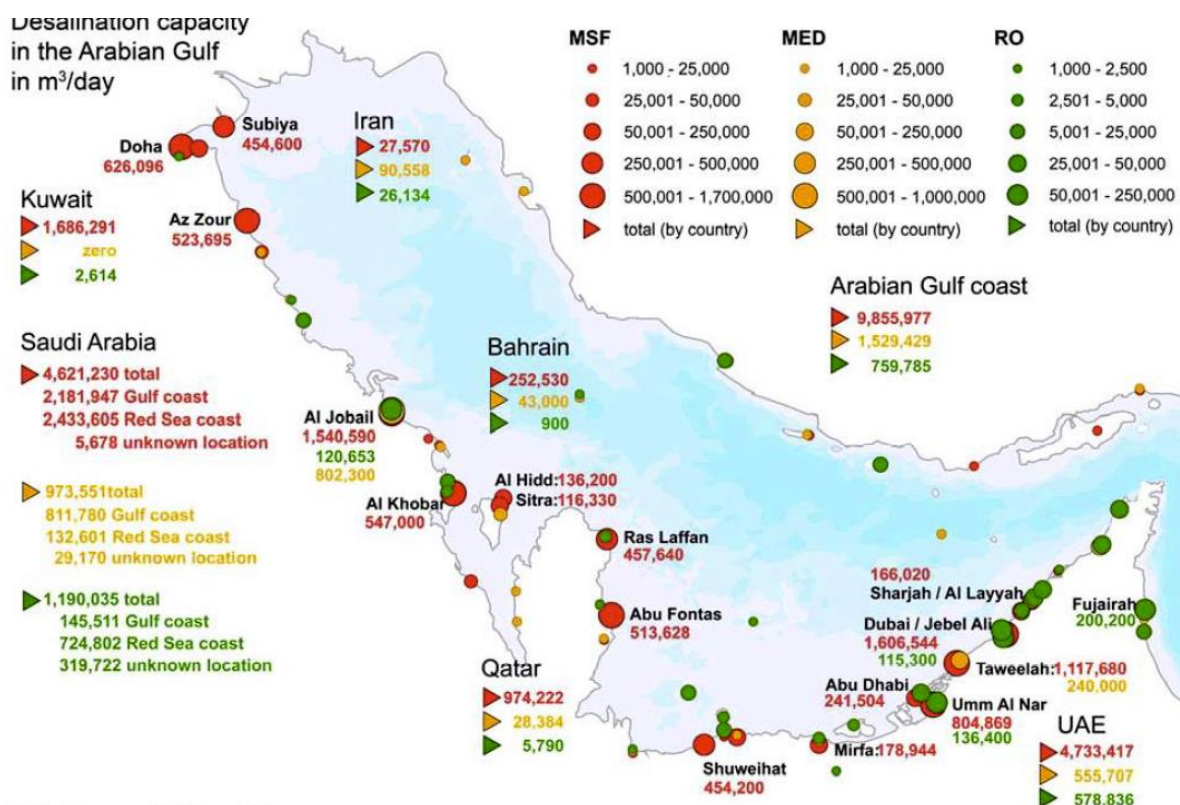
GLOBAL SHARE OF BRINE PRODUCTION BY REGION



شکل ۲- تولید آب نمک براساس منطقه و درصد سهم جهانی (Jones, 2019)

آب پذیرنده نیز مطلوب نیست؛ اما اثرات سوء آن کمتر است. در مقیاس جهانی، اقیانوس‌ها و دریاهای باز و عمیق، آسیب‌پذیری کمتری نسبت به تخلیه پساب شور واحدهای نمک‌زدایی دارند. اما محیط‌های دریایی نیمه بسته و محلی، بیشتر تحت آسیب دفع پساب شور قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، خلیج فارس یک دریای نیمه محصور کم عمق (با میانگین عمق ۳۵ متر و حداکثر ۱۰۰ متر) است که مطابق شکل ۳ یکی از نواحی با بیشترین تعداد و حجم واحدهای نمک‌زدایی است. در مناطق کم‌عمق پتانسیل تشکیل حباب‌های آب شور بیشتر است (Jones, 2019).

مجوزهای سیستم ملی حذف آلاینده (NPDES)^{۱۹} و قوانین کیفیت آب ایالتی/ محلی، ضوابط استاندارد برای دفع پساب واحدهای نمک‌زدایی آب دریا برای عدم آسیب به اکوسیستم دریائی و آبزیان را تدوین نموده است. با این‌حال، چالش‌های زیادی وجود دارد. به‌عنوان مثال، هیچ هدف خاصی برای جزئیات نحوه تصفیه یا کنترل آب نمک، و همچنین هیچ محدودیتی برای افزایش غلظت نمک وجود ندارد. تحقیقات علمی پیشنهاد کرده‌اند که سطح شوری پساب خروجی نباید از ۲ تا ۳ PSU (واحد عملی شوری^{۲۰}) تجاوز کند زیرا اکوسیستم دریایی برای دفع پساب سطوح بیش از آن دچار اثرات نامطلوب خواهد شد. علاوه بر سمیت ناشی از شوری پساب شور، اختلاف دمای پساب خروجی با منابع



شکل ۳- ظرفیت، نوع و واحدهای نمک‌زدایی آب در خلیج فارس (ارقام مترمکعب در روز) (Lattemann, 2010)

آبزیان را تهدید می‌کند. اول، برخورد، هنگامی که موجودات بزرگتر (مانند ماهی یا خرچنگ) با مش غربالگری ورودی برخورد کرده و کشته می‌شوند. تخلیه ضایعات شیمیایی عواملی که برای تمیز کردن صفحه‌ها استفاده می‌شوند، یک پیامد نامطلوب ثانویه مرتبط با برخورد است. دوم، زمانی که گونه‌های کوچک‌تر (مانند جلبک‌ها، پلانکتون‌ها یا باکتری‌ها) در طول عملیات از طریق کانال‌های ورودی به تصفیه‌خانه می‌روند و تلف می‌شوند. سپس، این بقایا دوباره در آب دریا ریخته شده و بهم خوردن تعادل در اکوسیستم را موجب می‌شود (Cooley et al., 2006).

یک تجزیه و تحلیل اثرات محیط‌زیستی توسط Missimer and Maliva (2018) برای بررسی پیامدهای ورودی آب و پیشنهاد راه‌حل انجام شد. وی گزارش کرد با تمهیداتی می‌توان برخورد و آسیب موجودات دریایی را مدیریت و از خسارات آن کاست. به‌طور مثال می‌توان آبیگری را از عمق پائین‌تر اقیانوس‌ها که در آن موجودات کمتری وجود دارد، انجام داد. علاوه بر این، سیستم‌های آبیگر زیرسطحی برای حذف این اثرات منفی، پیشنهاد شد. با این حال، آبیگر زیرسطحی علاوه بر هزینه بالاتر، اثرات اجتماعی دیگری مانند کاهش دسترسی به سواحل و اختلال در چشم‌انداز بصری را در پی دارد (Missimer and Maliva, 2018).

۳-۳- تحلیل اقتصادی و محاسبه قیمت تمام‌شده

هزینه نمک‌زدایی متغیر بوده و از عوامل متعددی نظیر هزینه انرژی، قیمت فروش آب، پیامدهای محیط‌زیستی و استفاده از زمین، تاثیر می‌پذیرد. برای ایران علاوه بر این موارد، تحریم و دشواری دسترسی به فناوری‌های سایر کشورها نیز وجود دارد. تحلیل اقتصادی هزینه‌های نمک‌زدایی کشورها به‌شدت تابع شرایط محلی بوده و عواملی نظیر کیفیت آب شور، طول خطوط انتقال، دسترسی و هزینه‌هایی تامین زمین، قیمت انرژی، ضوابط و مقررات محیط‌زیستی مربوط به دفع پساب و کیفیت مورد نیاز آب آشامیدنی، بر آن تاثیرگذار است؛ در شکل ۴ و جدول ۲ برآورد هزینه‌های راه‌اندازی و بهره‌برداری از واحدهای نمک‌زدایی آب شور بر مبنای شرایط نرمال، ارائه شده است. بنابر تحلیل‌های اقتصادی، به‌طور میانگین حدود ۵۰ درصد از کل هزینه‌ها در تاسیسات RO ناشی از تقاضای انرژی است. واحدهای نمک‌زدایی با روش‌های حرارتی حتی به انرژی بیشتری نیاز دارند، بنابراین هزینه‌های بالاتری دارند. از آنجایی که انرژی یک آیتم هزینه عمده برای نمک‌زدایی است، اپراتورها و دولت‌ها باید تلاش بیشتری برای مدیریت مصرف انرژی انجام دهند. یکی از این

بنابراین در شرایطی که اختلاط و پراکندگی پساب در آب دریا به شکل مناسبی انجام نشود، مقدار زیادی از آب شورتر در کف دریا تجمع یافته و در نتیجه به دلیل کمبود اکسیژن به موجودات کف دریا آسیب خواهد زد. اما در اقیانوس‌ها و دریاهای باز ممکن است اثرات منفی کمتر باشد. به‌عنوان مثال، شیلی در عرض جغرافیایی قرار دارد که در معرض جزر و مدی قوی است که می‌تواند به اختلاط سریع پساب نمکی تخلیه شده در اقیانوس آرام کمک کند (Ihsanullah et al., 2021). در نتیجه، کارخانه‌های نمک‌زدایی ساحلی، لوله‌های خود را در پشت نواحی جزر و مدی نصب می‌کنند تا به حداکثر رقت و در نتیجه تجمع کمتر کنسانتره نمک در محیط اعماق دریا برسند.

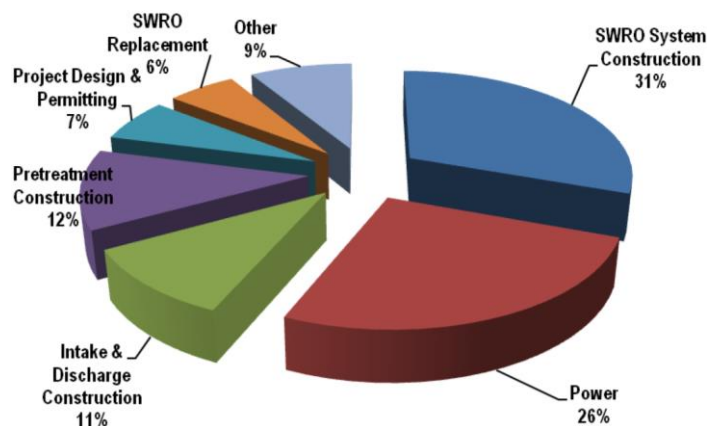
هرچند بنابر برخی تحقیقات در عربستان ادعا شده تاثیرات سوء محیط‌زیستی مربوط به تخلیه پساب به لحاظ شوری یا اختلاف دما قابل توجه نیست، لیکن در تحقیقات متعدد علمی ثابت شده که تخلیه پساب واحدهای نمک‌زدایی آب دریا، به آبزیان آسیب می‌رساند و در بلندمدت اکوسیستم دریایی محل تخلیه را دچار اختلال جدی می‌نماید (Jones, 2019). برای حذف تبعات منفی، تصفیه و تخلیه ایمن پساب شور خروجی از واحدهای نمک‌زدایی با هدف جلوگیری از آسیب به اکوسیستم دریایی ضروری است. مدیریت پساب نمکی می‌تواند شامل اضافه کردن آب خنک غیرقابل شرب برای کاهش شوری و دما، قبل از تخلیه مجدد به اقیانوس باشد. روش متعارف و مقرون‌به‌صرفه، بازگرداندن آب نمک به اقیانوس با اختلاط کامل بدون انباشتگی غلظت نمک است. البته اتخاذ سیستم تخلیه مایع صفر (ZLD) برای تصفیه آب نمک رویکرد مطلوب‌تری است که مستلزم سرمایه‌گذاری و صرف هزینه بیشتر است. نرخ بازیابی تاسیساتی که از ZLD استفاده می‌کند می‌تواند به ۹۹ درصد برسد، به این معنی که تولید آب نمک ناچیز خواهد بود. فرآیند ZLD منجر به محصول خشک جامد (مستقیماً در محل دفن زباله یا بازیافت نمک) و مقدار کمی آب تصفیه شده می‌شود که می‌تواند در همان تاسیسات برای اهداف تصفیه، مورد استفاده مجدد قرار گیرد (Charisiadis, 2018).

۳-۲-۲- اثرات منفی در آبیگر ورودی^{۲۱}

جریان دریافتی از دریا برای واحد نمک‌زدایی فقط حاوی آب و نمک نیست. کمیسیون انرژی کالیفرنیا در یکی از گزارش‌های خود آب دریا را چنین توصیف کرد: «این یک زیستگاه شامل اکوسیستمی کامل از فیتوپلانکتون‌ها، ماهی‌ها و بی‌مهرگان است». در طی فرآیند مصرف، دو مکانیسم اجتناب‌ناپذیر حیات

برای اولین سال بهره‌برداری به‌دست آمده است. این اعداد شامل تغییرات هزینه عملیاتی به‌دلیل در نظر گرفتن شوری آب خوراک، فناوری مورد استفاده، تقاضای انرژی، یارانه‌های موجود و هر شرایط محیطی دیگری است که به آن توجه شده است. هزینه انرژی (برق) بزرگترین متغیر منفرد است که بر هزینه خالص یک کارخانه آب‌شیرین‌کن تاثیر می‌گذارد (Youssef et al., 2014).

راه‌حل‌ها، احداث نیروگاه تولید برق در نزدیکی تاسیسات نمک‌زدایی برای داشتن تاسیسات دو منظوره است که هم‌زمان آب شیرین و برق تولید کند (Alkaisi et al., 2017). همان‌طور که در جدول ۳ نیز ذکر شده، با مطالعه هزینه عملیات ۲۵ کارخانه نمک‌زدایی RO در سراسر جهان، قیمت تمام‌شده تقریباً در محدوده ۰/۴۵ تا ۱/۴۸ دلار برای هر مترمکعب



شکل ۴- تفکیک هزینه‌های معمول برای واحدهای RO نمک‌زدایی آب دریا (SWRO) (Youssef et al., 2014)

جدول ۲- متغیرهای عملیات و نگهداری واحدهای نمک‌زدایی (مثال تیپ) (Youssef et al., 2014)

ردیف	متغیر	توضیحات	سهم از هزینه
۱	نگهداری	ابزار و تجهیزات تعمیر و نگهداری پمپ تعمیر و نگهداری تاسیسات ورودی تعویض جزئی تجهیزات ویدئومتری و کنترل	۶٪
۲	قانونی / مجاز	رعایت ضوابط محیط‌زیستی دفع پساب رعایت استاندارد کیفیت آب آشامیدنی سایر ضوابط و مقررات محیط‌زیستی	۲٪
۳	عملیات	کارکنان و کارگران	۶٪
		دفع لجن و مواد زائد در مراحل مختلف	۴٪
		تعویض فیلترهای کارتریج و غشای RO	۱۱٪
		انرژی (برق)	۵۵٪
		مواد شیمیایی مورد نیاز	۶٪
۴		سایر موارد	۱۰٪
		جمع کل:	۱۰۰

جدول ۳- محاسبه هزینه‌های نمک‌زدایی آب و برآورد در ایران با یارانه انرژی

روش	سرمایه‌گذاری احداث تاسیسات (\$/m ³ .day)	انرژی مورد نیاز (kWh/m ³)	قیمت تمام‌شده جهانی (\$/m ³)
روش‌های متداول حرارتی	۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰	>۱۰	۰/۸ تا ۱/۵
تقطیر چندمرحله‌ای	۹۰۰ تا ۲۰۰۰	۵ تا ۱۰	۰/۷ تا ۱/۲
اسمز معکوس آب دریا	۹۰۰ تا ۲۵۰۰	۳ تا ۵	۰/۵ تا ۱/۲
اسمز معکوس آب لب‌شور	۳۰۰ تا ۱۲۰۰	۰/۵ تا ۳	۰/۲ تا ۰/۴

به‌روش RO با احتساب هزینه انتقال، ارائه شود. در این جدول با توجه به شرایط انرژی در ایران و در دسترس بودن منابع فسیلی فراوان در مناطق جنوبی دو سناریوی قیمت جهانی انرژی و قیمت انرژی برای نمک‌زدایی آب در ایران (یارانه انرژی) تحلیل شده است.

قیمت تمام‌شده آب نمک‌زدایی شده بستگی کامل به بهای انرژی مورد استفاده دارد. در ایران، هزینه انرژی برای تاسیسات آب و فاضلاب مشابه بخش کشاورزی و با یارانه محاسبه می‌شود. بنابر ابلاغ وزارت نیرو (بخشنامه ۱۴۰۱/۲۷۸۰۰/۲۰۰ مورخ ۱۴۰۱/۰۴/۲۸) متوسط بهای هر کیلووات‌ساعت برق مصارف کشاورزی ۲۷۵ ریال بوده که با ضریب ماه‌های گرم برابر ۳۳۰ ریال خواهد بود که در مقایسه با نرخ صادرات برق (۸ تا ۱۰ سنت برای هر کیلووات‌ساعت معادل ۳۶ هزار ریال)، با ۹۹ درصد یارانه همراه است. در جدول ۴ برای محاسبه قیمت تمام‌شده نرخ سود سرمایه‌گذاری ۲۰ درصد، عمر مفید تاسیسات سازه‌ای ۱۵ سال و عمر تجهیزات مکانیکال و غشا ۵ سال فرض شده است. همچنین، به‌ازای هر ۱۰۰ کیلومتر انتقال آب و به‌ازای هر ۲۰۰ متر اختلاف ارتفاع برای انتقال یک مترمکعب آب، به‌طور تقریبی یک کیلووات-ساعت انرژی مورد نیاز خواهد بود.

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی، که سازگار با محیط‌زیست است، نیز مورد توجه قرار دارد هرچند قیمت تولید برق حرارتی از سوخت‌های فسیلی به لحاظ اقتصادی، به‌صرفه‌تر است. اتحادیه جهانی نمک‌زدایی (IDA)^{۲۳} رسیدن به هدف تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر برای ۲۰ درصد از نمک‌زدایی‌های جدید یا به‌روزرسانی شده تا سال ۲۰۲۵ را پیشنهاد داده است. به‌عنوان نمونه، عربستان سعودی قراردادی ۱۳۰ میلیون دلاری برای ساخت نیروگاه SWRO با انرژی خورشیدی با تولید ۶۰ هزار مترمکعب در روز امضا کرده است (Alkaisi et al., 2017). کشورهای دیگر مانند امارات متحده عربی، اسپانیا و هند در حال اجرای آزمایش‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ قبل از استفاده کامل هستند.

علاوه‌بر هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری اولیه در احداث تاسیسات، سایر هزینه‌ها شامل انتقال و توزیع آب، ضدعفونی و گندزائی آب و هزینه‌های محیط‌زیستی اقلام اصلی قیمت تمام‌شده آب در تاسیسات نمک‌زدایی را تشکیل می‌دهند. هرچند اظهارنظر دقیق در خصوص قیمت تمام شده آب مستلزم بررسی دقیق به‌صورت موردی با احتساب هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نرخ بهره و نرخ فروش آب است، لیکن در جدول ۳ سعی شده بر مبنای اطلاعات موجود، برآورد قیمت تمام‌شده آب نمک‌زدایی شده

جدول ۴- برآورد قیمت تمام‌شده آب نمک‌زدایی‌شده برای نواحی مختلف ایران (روش اسمز معکوس)

قیمت تمام‌شده* (ریال/مترمکعب)		طول مسیر خط انتقال (km)	مراکز استانی
انرژی با یارانه و کمک دولتی	بهای جهانی انرژی بدون کمک دولتی		
۴۳۲۰۰۰	۶۲۴۰۰۰	صفر	چابهار، بندرعباس و بوشهر (مجاورت دریا)
۹۷۲۰۰۰	۱۱۶۴۰۰۰	۱۰۰۰	یزد
۱۰۲۶۰۰۰	۱۲۱۸۰۰۰	۱۱۰۰	بیرجند
۷۰۲۰۰۰	۸۹۴۰۰۰	متوسط: ۵۰۰	جنوب کرمان

* مبنای محاسبات، تبدیل هر یک دلار معادل ۴۰۰ هزار ریال بوده است.

مقایسه وضعیت تامین آب در ایران، با کشورهای حاشیه خلیج فارس صحیح نیست. سرانه آب تجدیدپذیر به‌ازای هر نفر در عربستان، امارات متحده عربی، کویت، بحرین و قطر به‌ترتیب ۸۹، ۲۲، ۷، ۴ و ۳۵ مترمکعب در سال است و در این کشورها تقریباً رودخانه یا منابع قابل توجه آب سطحی وجود ندارد. در مقابل، این کشورها سرشار از منابع انرژی بوده و به‌دلیل مجاورت با خلیج فارس و دریای سرخ، دسترسی به آب شور برای آن‌ها فراهم است. بنابراین نمک‌زدایی آب دریا راه‌کاری مطلوب برای این منطقه تلقی می‌شود، هرچند ممکن است برای سایر کشورها، در این حد مطلوبیت نداشته باشد.

در تمامی این حالت‌ها حتی با اعمال یارانه انرژی، قیمت تمام‌شده آب نسبت به سایر روش‌ها از جمله اصلاح فرایندها برای کاهش مصرف آب (تمرکز روی برنامه‌های خوش‌مصرفی و سازگاری با کم‌آبی) و یا بازچرخانی پساب برای صنعت، گران‌تر و غیرقابل توجیه اقتصادی است. بنابراین، بجز مصارف شرب که نیاز حیاتی جامعه بوده و تامین منابع پایدار آب به لحاظ ژئواستراتژیک فراتر از تحلیل اقتصادی ضرورت دارد، در خصوص مصارف کشاورزی توجیه‌ناپذیر و در خصوص مصارف صنعتی هم نیازمند آنالیز و تحلیل دقیق مطابق با شرایط خاص صنعت و موقعیت جغرافیائی در مقایسه با سناریوهای جایگزین است. بنابراین،

۴-۳- برآورد نیاز نمک‌زدایی در ایران

در ایران وزارت نیرو به‌عنوان نهاد متولی مدیریت منابع آب، استان‌های کشور را مطابق تعاریف جدول ۵ در شش دسته مرطوب، نرمال، قابل‌تحمل، دارای تنش آبی، دارای تنش آبی

شدید و کمبود آب طبقه‌بندی کرده است. استان‌های بوشهر، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، فارس، کرمان، هرمزگان و یزد در رده مناطق در مواجهه با کمبود آب قرار گرفته‌اند. بنابراین، استفاده از فناوری نمک‌زدایی آب دریا به‌عنوان یک گزینه برای تامین پایدار بخشی از نیاز آبی این استان‌ها مورد توجه قرار دارد.

جدول ۵- توصیف وضعیت و طبقه‌بندی مناطق بر مبنای منابع آب در دسترس

منطقه	توصیف وضعیت
مرطوب	امکان افزایش ظرفیت منابع آب به‌منظور مدیریت و مصرف در سال‌های آتی به‌ویژه در آبیگری مخازن فراهم است.
نرمال	وضعیت منابع آب در شرایط عادی بوده و مدیریت آن مطابق روال معمول قابل انجام است.
قابل تحمل	شرایط در آستانه ورود به تنش آبی قرار دارد که با اعمال مدیریت مناسب و بدون نیاز به اتخاذ تمهیدات ویژه می‌توان از آن پیشگیری نمود.
تنش آبی	وجود محدودیت جدی برای تامین آب در دسترس، لیکن با اعمال روش‌های ویژه مدیریتی و برنامه‌ریزی منابع آب عبور از آن امکان‌پذیر خواهد بود.
تنش آبی شدید	وضعیت قرمز برای کمبود آب وجود دارد به‌نحوی که با اعمال تمهیدات سازه‌ای (مانند حفر چاه و استفاده از حجم مرده مخازن سدها) و سایر ابتکارات مدیریتی می‌توان از شدت صدمات کاست. البته تامین نیاز بخش‌هایی از مصارف به‌ویژه کشاورزی دشوار بوده و باید نسبت به صرفه‌جویی عملی در بخش‌های مختلف اقدام نمود.
کمبود آبی	بیانگر وضعیت هشدار بوده که آب کافی برای پاسخگویی به نیاز منطقه وجود ندارد و لازم است آمادگی لازم برای ورود به آستانه شرایط حاد مد نظر قرار گیرد.

کمبود آب شامل تنش آبی، کم‌آبی و بحران آب به معنای نبود منابع آب شیرین برای تامین تقاضای آب متعارف است که باید به هر شکل ممکن، صرف‌نظر از مسائل اقتصادی، نسبت به رفع پایدار آن اقدام نمود. نگاه نوآورانه این پژوهش، مقایسه و تحلیل

بخش دارای کمبود آب کشور به‌عنوان یک ناحیه مستقل با کشورهای کم‌آب حاشیه خلیج فارس و در نتیجه، محاسبه ظرفیت مورد نیاز برای نمک‌زدایی است که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- جدول آمار و تحلیل اطلاعات تولید و مصرف آب و محاسبه ظرفیت نمک‌زدایی

نام کشور/استان	جمعیت سال ۱۳۹۵ (میلیون نفر)	سرانه آب تجدیدپذیر (مترمکعب)	متوسط مصرف خانگی** (میلیون مترمکعب)	ظرفیت نمک‌زدایی ۱۴۰۱ (میلیون مترمکعب/سال)	برنامه نمک‌زدایی پیشنهادی (شرب) (میلیون مترمکعب/سال)	
وضعیت فعلی برای کل ایران	۸۰	۱۲۰۶	۵۴۰۰	۲۱۳	۴۲۱	
منطقه خشک ایران (کمبود آبی مطابق جدول ۲)	سیستان و بلوچستان	۲/۸	۵۱۴	۱۸۹	۲۵	۳۸
	هرمزگان	۱/۸	۱۵۹۶	۱۲۲	۹۹	۲۳
	بوشهر	۱/۲	۸۳۸	۸۱	۵۳	۲۸
	کرمان	۳/۲	۶۰۸	۲۱۶	-	۷۲
	یزد	۱/۳	۷۱	۸۸	-	۲۹
	خراسان جنوبی	۰/۸	۱۰۲	۵۴	-	۱۸
	کل مناطق	۱۰/۷۵	۸۹۹	۷۵۰	۱۷۷	۲۰۸
عربستان	۳۳	۸۹/۵	۴۲۰۰	۴۲۸۰	-	
امارات متحده عربی	۹/۹	۲۱/۶	۱۲۶۰	۲۷۵۰	-	

* در محاسبه متوسط مصرف خانگی، سرانه مصرف هر نفر در شبانه‌روز برای ایران ۱۸۵ لیتر/نفر-روز و برای عربستان و امارات با توجه به گرمای هوا و پذیرش جمعیت زائر و توریست و همچنین سطح بالای درآمد اقتصادی، بیشتر از ۳۵۰ لیتر/نفر-روز منظور شده است. برای شهرهای مجاور دریا (فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر) ۱۰۰ درصد و برای سایر مناطق ۳۰ درصد از مصرف از نمک‌زدایی لحاظ شده است.

۴-۵- چشم‌انداز نمک‌زدایی

پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، کمبود آب بر ۵ میلیارد نفر تأثیر بگذارد. رشد اخیر در بازار جهانی آب شیرین‌کن نشان‌دهنده

چالش‌ها و چشم‌اندازها برای این صنعت است. چالش‌هایی که مانع رشد نمک‌زدایی می‌شوند شامل هزینه انرژی و نگرانی‌های دریایی و محیط‌زیستی می‌شود. رویکردها برای پرداختن به این چالش‌ها

شده و نتایج پژوهش حاضر، گزاره‌های زیر مطابق با شرایط ایران برای برنامه‌ریزان حوزه آب کشور پیشنهاد می‌شود:

- با توجه به هزینه تمام‌شده و مقایسه سرانه آب تجدیدپذیر ایران با سایر کشورهای جهان، نمک‌زدایی آب برای مصارف شرب و خانگی در مناطق بدون منابع آب پایدار، اجتناب‌ناپذیر است اما برای کشاورزی و یا شرب در مناطقی که امکان دسترسی به سایر منابع آب وجود دارد، غیرقابل توجیه است. در خصوص صنعت، در هر مورد با تحلیل اقتصادی قیمت تمام شده آب و میزان دسترسی به سایر منابع آب نظیر پساب فاضلاب شهری و یا امکان اصلاح فرایندها برای کاهش مصرف آب، تصمیم‌گیری قابل انجام خواهد بود. در این خصوص توجه به مفهوم همبست آب-غذا-انرژی سودمند است.

- استفاده از فناوری RO به‌عنوان مناسب‌ترین روش از بین سایر روش‌های موجود، برای توسعه واحدهای نمک‌زدایی و در مجاورت سواحل ایران توصیه می‌شود. سواحل مکران به‌دلیل شوری کمتر آب دریای عمان و ظرفیت بالاتر برای پذیرش پساب شور و خط ساحل طولانی، قابلیت تبدیل به قطب نمک‌زدایی و ارسال آب به استان‌های شرق و مرکز کشور را دارد.

- برای جلوگیری از آسیب فزاینده به اکوسیستم خلیج فارس، تشکیل کمیته حفاظت خلیج در برابر پساب شور با مشارکت کشورهای حاشیه مورد نیاز است. با فرض تحقق توسعه نمک‌زدایی تا دو برابر ظرفیت موجود و رسیدن به رقم یک میلیون مترمکعب در روز حتی با فرض عدم توسعه واحدهای نمک‌زدایی در خلیج فارس، سهم ایران کمتر از ۵ درصد نسبت به سایر همسایگان ناچیز خواهد بود.

- توسعه فناوری‌های صنعتی مربوط به ساخت و نصب و بهره‌برداری تاسیسات نمک‌زدایی آب دریا به‌صورت بومی برای ایران و با نگاه به صادرات به کشورهای جنوب خلیج فارس به‌عنوان یک صنعت ژئواستراتژیک و سودآور با توجه به ظرفیت بالای ساخت تجهیزات و شرکت‌های دانش‌بنیان کشور، اهمیت دارد.

- سرمایه‌گذاری برای تولید برق هسته‌ای یا تجدیدپذیر برای رعایت مسائل محیط‌زیستی و حتی احداث نیروگاه‌های حرارتی تولید برق در مجاورت تاسیسات نمک‌زدایی، برای آینده این صنعت مورد نیاز خواهد بود.

- با توجه به این‌که حجم قابل توجهی از منابع آب سطحی ایران، بالغ بر ۱۰ میلیارد مترمکعب، به‌صورت سالانه از غرب و جنوب غرب ایران به کشور عراق و خلیج فارس تخلیه می‌شود و با

حول محور کاهش هزینه و به حداقل رساندن پیامدهای محیط‌زیستی است. یکی از رویکردهای اصلی برای کاهش هزینه، کاهش مصرف انرژی یا یافتن منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین است. قیمت انرژی‌های تجدیدپذیر در حال کاهش است و انتظار می‌رود با توجه به فناوری پیشرفته توجه بیشتری را به خود جلب کند. انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند هزینه نمک‌زدایی را در درازمدت کاهش دهند، زیرا قیمت‌ها کاهش می‌یابد و احتمالاً در آینده با پیشرفت فن‌آوری، میزان کاهش بیشتر هم خواهد شد. از سوی دیگر، تولید آب نمک تاثیر عمده محیط‌زیستی ناشی از نمک‌زدایی است. متأسفانه، در اکثر تاسیسات، پساب نمکی خروجی واحدهای تصفیه در اقیانوس دفع می‌شود زیرا مدیریت آب نمک گران و هزینه‌بر است. مقررات بین‌المللی محیط‌زیست، روش‌های دفع مرسوم مانند تخلیه به آب دریا، آب سطحی یا تزریق چاه عمیق را محدود خواهد کرد.

آب آشامیدنی علاوه بر آب خالص، حاوی مواد معدنی مانند کلسیم، منیزیم، منگنز، سدیم، فلوراید، کلرید، ید و پتاسیم است که برای سلامت انسان حیاتی هستند. از سوی دیگر، آب شیرین‌شده به‌دلیل فرآیند حذف نمک‌ها و سایر آلاینده‌های یونی طبیعی، فاقد اکثر این عناصر است. سازمان بهداشت جهانی (WHO) ضوابطی را برای کیفیت آب آشامیدنی (GDWQ)^{۲۴} و آب آشامیدنی ایمن حاصل از نمک‌زدایی منتشر کرده تا زمینه مقرراتی لازم برای تولید آب آشامیدنی ایمن‌تر فراهم شود (Darre and Toor, 2018).

مطالعه‌ای با مقایسه ۲۶ مکان مختلف در اسرائیل قبل و بعد از اجرای نمک‌زدایی نشان داد که نیمی از جمعیت مورد مطالعه (که بعد از آن به آب شیرین شده متکی بودند) کمبود منیزیم داشتند. علاوه بر این، کمبود فلوراید در آب نمک‌زدایی تشخیص داده شده و با پوسیدگی دندان‌ها مرتبط است. معدنی‌سازی مجدد به‌عنوان یک فرآیند پس از نمک‌زدایی برای دستیابی به کیفیت مطلوب آب معرفی می‌شود. این کار را می‌توان با مخلوط کردن آب شیرین‌شده با آب‌های زیرزمینی یا اعمال دی‌اکسیدکربن با فیلترهای انحلال سنگ آهک انجام داد. با این حال، اکثر تاسیسات نمک‌زدایی تمام مواد معدنی ضروری را اضافه نمی‌کنند. بنابراین باید مقررات سخت‌گیرانه‌تری اعمال شود تا اطمینان حاصل شود که آب محصول نهایی، حاوی مواد حیاتی مورد نیاز در حد استانداردهای آب آشامیدنی، باشد (Khaled et al., 2020).

با وجود همه این موانع، نمک‌زدایی می‌تواند یکی از مطمئن‌ترین منابع آب برای آینده باشد. بر مبنای بررسی کشورهای پیشرو در زمینه نمک‌زدایی آب شور، تحلیل‌های انجام

- 4- Multi-Stage Flash
- 5- Multi-Effect Distillation
- 6- Reverse Osmosis
- 7- Microfiltration
- 8- Ultrafiltration
- 9- Nano Filtration
- 10- Middle East and North Africa
- 11- Saline Water Conversion Corporation
- 12- Saline Water Conversion Act
- 13- Office of Water Research and Technology
- 14- Brackish
- 15- Carlsbad Desalination Plant
- 16- California Department of Water Resources
- 17- United Nations Food and Agriculture Organization
- 18- Zero Liquid Discharge
- 19- National Pollutant Discharge Elimination System
- 20- Practical Salinity Unit
- 21- Water Intake
- 22- International Desalination Association's
- 23- Guidelines for Drinking Water Quality

۷- مراجع

- Ajjur, S.B.B., and Baalousha, H.M., (2021), "A review on implementing managed aquifer recharge in the Middle East and North Africa region: Methods, progress and challenges", *Water International*, 46, 578-604, <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1889192>.
- Alkaisi, A., Mossad, R. and Sharifian-Barforoush, A., (2017), "A review of the water desalination systems integrated with renewable energy", *Energy Procedia*, 110, 268-274, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>.
- Alobreed, A.N., (2014), "Global water desalination: A comparison between Saudi Arabia and The United States of America", MSc Thesis, Department of Environmental and Occupational Health, School of Public Health, University of Pittsburgh, United States.
- Asif, M., Faizur, R., Hafiz, Z., and Zubair, M., (2019), "Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination: Phenomena, impact, and control; future directions", *Desalination*, 455(1-2), 135-157, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.009>.
- Charisiadis, C., (2018), "Brine zero liquid discharge (ZLD) fundamentals and design", LENNTECH Report, Netherlands, <https://www.lennotech.com/Data-sheets/ZLD-booklet-for-Lennotech-site-min-L.pdf>.
- Cooly, H., Gleick, P.H., and Wolf, G., (2006), *Desalination with a grain of salt, A California perspective*, Pacific Institute.
- Curto, D., Franzitta, V., and Guercio, A., (2021), "A review of the water desalination technologies", *Applied Sciences*, 11(2), 670, <https://doi.org/10.3390/app11020670>.
- Darre, N.C., and Toor, G.S., (2018), "Desalination of water: A review", *Current Pollution Reports*, 4(7), 104-111, <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0085-9>.

در نظرگیری مسائل محیط‌زیستی نمک‌زدایی آب دریا و هزینه تمام‌شده بالای آن، به نظر می‌رسد برای تامین آب نواحی مرکزی و جنوبی ایران، باید سایر گزینه‌ها نظیر انتقال آب از نواحی غربی نیز مورد توجه قرار گیرد.

۴- جمع‌بندی

بدون منابع آب شیرین کافی، رفاه اجتماعی و توسعه صنعتی مختل می‌شود. برای نمک‌زدایی آب شور مانند هر عملیات استخراج منابع از معدن، روش ایده‌آلی که کاملاً عاری از مخاطرات محیطی باشد، وجود ندارد. نمک‌زدایی یک فناوری قدرتمند است که می‌تواند از بحران کمبود آب شیرین به‌طور موثری جلوگیری یا تبعات منفی آن را کاهش دهد. کمبود آب و مسائل مربوط به بهداشت عمومی تحت فشار فزاینده‌ای از رشد جمعیت و تغییرات آب و هوایی قرار دارد. تا سال ۲۰۲۵، بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق تحت تنش آبی زندگی خواهند کرد. اگرچه نمک‌زدایی بسیار مفید است، اما اولاً هر کشوری نمی‌تواند هزینه آن را بپردازد و ثانیاً به‌جز در مناطق با بحران تنش شدید آبی، برای سایر مناطق استفاده از سایر روش‌ها مقرون‌به‌صرفه‌تر است. اکثریت قریب به اتفاق کشورهای که در حال حاضر از نمک‌زدایی استفاده می‌کنند، مناطقی با درآمد بالا و سرانه آب تجدیدپذیر کمتر از ۵۰۰ مترمکعب/نفر-سال هستند. رشد فناوری‌های نمک‌زدایی همراه با انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند در آینده به تولید آب شیرین پاک بیشتر با هزینه کمتر، کمک نمایند.

۵- قدردانی

ایده اصلی انجام پژوهش و نگارش این مقاله در کلاس درس استاد فرزانه امیر حبیب‌الله سیاری، رئیس ستاد و معاون هماهنگ‌کننده ارتش جمهوری اسلامی ایران و عضو هیئت‌علمی دانشگاه عالی دفاع ملی، در راستای تامین پایدار آب به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های اصلی توسعه سواحل مکران مطرح شد که جای تقدیر و تشکر دارد. ارزش معنوی این اثر به امیر سیاری و تمامی دریادلان نیروی دریائی ارتش جمهوری اسلامی ایران تقدیم می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Guidelines for Drinking-Water Quality
- 2- World Health Organization
- 3- Part per Million (ppm) = mg/Lit

- Panagopoulos, A., Haralambous, K.J., and Loizidou, M., (2019), "Desalination brine disposal methods and treatment technologies, A review", *Science of the Total Environment*, 693, 133545, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>.
- Schorr, M., Valdez, B., Ocampo, J., So, A. and Eliezer, A., (2012), "Materials and corrosion control in desalination plants", *Materials Performance*, 51(5), 56-60.
- Xu, P., Cath, T.Y., Robertson, A.P., Reinhard, M., Lech, J.O., and Drewes, J.E., (2013), "Critical review of desalination concentrate management, treatment and beneficial use", *Environmental Engineering Science*, 30(8), 502-514, <https://doi.org/10.1089/ees.2012.0348>.
- Youssef, P.G., AL-Dadah, R.K., and Mahmoud, S.M., (2014), "Comparative analysis of desalination technologies", *Energy Procedia*, 61, 2604-2607, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.258>.
- Elimelech, M., and Phillip, W.A., (2011), "The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment", *Science of the Total Environment*, 333(6043), 712-717, <https://doi.org/10.1126/science.1200488>.
- FAO, (2018), *Progress on level of water stress, Global baseline for SDG 6 Indicator*, FAO/UN-Water, Rome, 58 p. www.fao.org/3/CA1592EN/ca1592en.pdf.
- Huang, H., Zhao, L., Yu, Q., Lin, P., Xu, J., Yin, X., Chen, S., Wang, H., and Wang, L., (2020), "Flexible and highly efficient bilayer photothermal paper for water desalination and purification: Self-floating, rapid water transport, and localized heat", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(9), 11204-11213, <https://doi.org/10.1021/acsami.9b22338>.
- Ihsanullah, I., Atieh, M., Sajid, M., Nazal, M., (2021), "Review: Desalination and environment, A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies", *Science of The Total Environment*, 780, 146585, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146585>.
- Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M.T., Smakhtin, V., and Kang, S.M., (2019), "The state of desalination and brine production: A global outlook", *Science of the Total Environment*, 657, 13, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>.
- Keller, N.H.T., (2020), "OECD water governance principles on the local scale, An exploration in Dutch water management", *International Journal of River Basin Management*, 18, 439-444, <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1653308>.
- Khaled, E., Mohammed, K., Enas, T., Mohammad, A. A., Tabbi, W., and Olabi, A., (2020), "Environmental impact of emerging desalination technologies: A preliminary evaluation", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 748, 141528, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>.
- Lattemann, S., Kennedy, M.D., Schippers, J., and Amy, G., (2010), "Global desalination situation", *Sustainability Science and Engineering*, 2, 7-39, [https://doi.org/10.1016/S1871-2711\(09\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S1871-2711(09)00202-5).
- Miller, O.L., Putman, A.L., Alder, J., Miller, M., Jones, D.K., and Wise, D.R., (2021), "Changing climate drives future streamflow declines and challenges in meeting water demand across the southwestern United States", *Journal of Hydrology*, X, 11, 100074, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2021.100074>.
- Missimer, T.M., and Maliva, R.G., (2018), "Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls", *Desalination*, 434, 17, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>.
- Moradi, M.R., Pihlajamaki, A., Hesampour, M., Ahlgren, J., and Manttari, M., (2019), "End-of-life RO membranes recycling: Reuse as NF membranes by polyelectrolyte layer-by-layer deposition", *Journal of Membrane Science*, 584, 300-308, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.04.060>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.